

УДК 630*114.53

**ФИТОТОКСИЧНОСТЬ ПОЧВ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ
В УСЛОВИЯХ АЭРОТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

Н.В. МАРИНА – доцент кафедры лесных культур и биофизики*
e-mail: labbav@yandex.ru

А.С. ПОПОВ – доцент кафедры лесных культур и биофизики*
e-mail: sergeich66@yandex.ru

Ю.Р. КАСИМОВА – магистрант кафедры лесных культур и биофизики*
e-mail: kasimova_julia@mail.ru

М.В. КУЧЕНКОВА – магистрант кафедры лесных культур и биофизики*
e-mail: kuchenkova-96@mail.ru

* ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»,
620100, Россия, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37,
тел.: 8 (343) 261-52-88.

Ключевые слова: аэротехногенные загрязнения, древостои сосны обыкновенной, фитотоксичность почв, *Chlorella vulgaris* Beijer.

Материалы статьи посвящены определению фитотоксичности почв сосновых древостоев, произрастающих в зонах действия разных по составу аэротехногенных загрязнений. Первый источник загрязнений – Среднеуральский медеплавильный завод, основным экотоксикантом в выбросах которого является диоксид серы, обладающий кислотными свойствами. Второй источник загрязнения – ООО «Комбинат строительных материалов». Основным поллютантом в составе его аэротехногенных выбросов является пыль. Соединения, входящие в состав пылевых частиц, имеют щелочные свойства. Для определения фитотоксичности почв использовали метод биотестирования, основанный на сравнении суточного прироста численности клеток водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer в контрольном и опытном вариантах. Помимо этого, в образцах почвы по общепринятым методикам определяли pH водной почвенной суспензии и содержание элементов минерального питания. В результате проведенных исследований установлено, что аэротехногенные загрязнения Среднеуральского медеплавильного завода повышают кислотность почвы импактной зоны в среднем на 1 единицу значений pH по сравнению с таковой почв фоновой зоны. Выбросы комбината строительных материалов, наоборот, подщелачивают почвы до значений pH выше 8 единиц. При определении элементов минерального питания в образцах почв было выявлено, что в целом содержание нитратного азота, водорастворимого калия и подвижного фосфора в исследуемых почвах вне зависимости от природы загрязнений и степени техногенной нагрузки находится на низком уровне. Анализ результатов определения фитотоксичности почв показал, что в условиях загрязнения негативное влияние водных почвенных вытяжек на *Chlorella vulgaris* Beijer проявляется в агрегации клеток и разрушении хлорофилла водоросли. При этом подкисление почвы за счет выбросов диоксида серы вызывает незначительную стимуляцию ростовых процессов тест-культуры, а подщелачивание почвы такого эффекта не дает. Для почв фоновой зоны выявлен факт агрегации клеток водоросли на фоне сильного стимулирующего воздействия на *Chlorella vulgaris* Beijer, происходящей без разрушения хлорофилла.

PHYTOTOXICITY OF SOILS OF PINE FOREST STANDS IN THE CONDITIONS OF AERO TECHNOGENIC POLLUTION

N.V. MARINA – associate professor of department
of forest cultures and biophysics*
e-mail: labbav@yandex.ru

A.S. POPOV – associate professor of department
of forest cultures and biophysics*
e-mail: sergeich66@yandex.ru

YU.R. KASIMOVA – undergraduate of department
of forest cultures and biophysics*
e-mail: kasimova_julia@mail.ru

M.V. KUCHENKOVA – undergraduate of department
of forest cultures and biophysics*
e-mail: kuchenkova-96@mail.ru

* FSBEI HE «Ural State Forest Engineering University»,
620100, Russia, Yekaterinburg, Sibirsky tract, 37;
Phone: +7 (343) 261-52-88

Keywords: *aero technogenic pollution, forest stands of a pine ordinary, phytotoxicity of soils, Chlorella vulgaris Beijer.*

Materials of article are devoted to determination of phytotoxicity of soils of the pine forest stands growing in areas of coverage of aero technogenic pollution, different in structure. The first source of pollution – Sredneuralskiy Copper Smelter which main ekotoksikant in emissions is the sulfur dioxide having acid properties. The second source of pollution – LLC Plant of Construction Materials. The main pollyutant as a part of his aero technogenic emissions is dust. The connections which are a part of dust particles have alkaline properties. For determination of phytotoxicity of soils used the biotesting method based on comparison of daily gain of number of cages of an alga of Chlorella vulgaris Beijer in control and skilled options. In addition in soil samples determined by the standard techniques pH water soil suspension and the maintenance of elements of mineral food. As a result of the conducted researches it is established that aerotekhogenny pollution of the Sredneuralsk copper-smelting plant increase acidity of the soil of an impaktny zone on average by 1 unit of values pH in comparison with soils of a background zone. Emissions of plant of construction materials, on the contrary, alkalinize soils to values pH over 8 units. When determining elements of mineral food in samples of soils it was revealed that in general the content of nitrate nitrogen, water-soluble potassium and mobile phosphorus, regardless of the nature of pollution and degree of technogenic loading, is in the explored soils at a low level. The analysis of results of determination of phytotoxicity of soils showed that in the conditions of pollution negative impact of water soil extracts on Chlorella vulgaris Beijer is shown in aggregation of cages and destruction of a chlorophyll of an alga. At the same time acidulation of the soil due to emissions of dioxide of sulfur causes insignificant stimulation of growth processes of test culture, and alkalifying of the soil of such effect does not give. For soils of a background zone the fact of aggregation of cages of the alga against the background of the strong stimulating impact on Chlorella vulgaris Beijer occurring without destruction of a chlorophyll is elicited.

Введение

Почвы, накапливая значительную часть аэротоксикантов, могут служить в качестве индикатора

техногенного воздействия на окружающую среду. По эффекту воздействия на почвы все экотоксиканты можно разделить

на педохимически активные и биохимически активные вещества [1]. Первые, преобладающие в выбросах по массе, способны

изменять окислительно-восстановительные и кислотно-основные характеристики почв. К ним, в частности, относятся минеральные кислоты, получающиеся при взаимодействии кислых газообразных веществ (SO_2 , NO_2 и др.) с атмосферной влагой. При достижении определенного уровня подкисление или подщелачивание почвы может вызывать негативные последствия для почвенной биоты. Группа биохимически активных для почв веществ включает высокотоксичные для живых организмов соединения [1]. В частности к ним относятся тяжелые металлы, в том числе медь, кобальт, свинец, кадмий, которые присутствуют в аэротехногенных выбросах предприятий цветной и черной металлургии.

Одна из особенностей загрязнения окружающей среды экотоксикантами химической природы заключается в их возможном комбинированном и сочетанном влиянии на окружающую среду, включая эффект синергизма. Это требует не только знания их индивидуального содержания в почве, но и учета их совместного воздействия.

Метод биотестирования позволяет провести оценку негативного влияния на состояние почв целого комплекса экотоксикантов, а интегральной оценкой степени загрязнения почв может служить их потенциальная фитотоксичность.

Цель данной работы – определить фитотоксичность почв сосновых древостоев в условиях аэротехногенного загрязнения.

Цель, задача, методика и объекты исследования

Исследования проводили в районах действия двух точечных источников загрязнения.

Первый район расположен на юго-западе Свердловской области в зоне действия Первоуральско-Ревдинского промышленного узла. Основным источником аэротехногенного загрязнения района является Среднеуральский медеплавильный завод (СУМЗ).

Исследования проводили на трех пробных площадях (ПП), заложенных в лесных культурах сосны. Две из них – ПП 9(1) и ПП 9(2) – находятся в импактной зоне на удалении 4,0 км в северо-восточном направлении от СУМЗа. Контрольная ПП 4 расположена в фоновой зоне на расстоянии 19,2 км в юго-западном направлении от завода.

Основным экотоксикантом в выбросах Среднеуральского медеплавильного завода является диоксид серы, действие которого на наземные экосистемы проявляется в подкислении среды. Негативный эффект усиливается токсическим действием тяжелых металлов (меди, кобальта, кадмия и др.), сорбированных на пылевых частицах выбросов [2, 3].

Второй точечный источник загрязнения – ООО «Комбинат строительных материалов», г. Богданович (КСМ). Основным поллютантом в составе его аэротехногенных выбросов является пыль, содержащая продукты процесса получения известня при обжиге известняка и доломита. Соединения, входящие в состав

пылевых частиц, имеют щелочные свойства.

С учетом преобладающих ветров западных и северо-западных направлений на удалении от 300 до 500 м от КСМ в лесных культурах сосны заложили 5 ПП, шестую пробную площадь (ПП 6) расположили на расстоянии 1,6 км к северо-востоку от источника загрязнений.

Образцы почв отбирали из корнеобитаемого слоя. Для проведения лабораторных исследований их готовили по стандартной методике [4, 5].

Активную кислотность почвы (рН) определяли в водных почвенных суспензиях потенциометрическим методом [4]. Определение нитратного азота проводили методом прямой потенциометрии с нитрат-селективным электродом [5, 6]. Определение содержания водорастворимого калия проводили в водной почвенной вытяжке методом прямой потенциометрии с использованием калий-селективного электрода [7-9]. Содержание подвижного фосфора определяли фотометрическим методом по Кирсанову [10].

Определение фитотоксичности почвы проводили методом биотестирования [11, 12] с учетом возможной агрегации клеток водоросли [13]. Этот метод основан на сравнении суточного прироста численности клеток зеленой одноклеточной водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer в контрольном и опытном вариантах. Относительная погрешность метода биотестирования по изменению оптической плотности

культуры водоросли хлорелла составляет 25 % [11]*.

Результаты и их обсуждение

Одним из показателей, влияющих на тест-культуру, является кислотность почвы. Выбросы источников загрязнения, имеющие либо кислотный (СУМЗ), либо щелочной (КСМ) характер, будут изменять pH почвенной суспензии, что, в свою очередь, может негативно влиять на тест-культуру, поскольку оптимальный интервал значений pH для *Chlorella vulgaris* Beijer лежит в пределах 5–8 единиц.

В табл. 1 приведены данные об актуальной кислотности почв в районе СУМЗа. Значения pH водных почвенных суспензий контрольной ПП лежат в интервале 5,12–5,50 единиц, что оптимально как для тест-культуры, так и для сосны обыкновенной (оптимальный интервал pH лежит в пределах от 5,0 до 6,2).

Более высокая кислотность почв характерна для района сильного загрязнения, что объясняется в основном выбросами диоксида серы. В целом для ПП 9(1) и ПП 9(2) значения pH почвенных суспензий лежат в пределах 4,2–4,5 единиц pH, что негативно может действовать на ростовые функции тест-культуры. Кроме того, при повышении кислотности почвы катионы многих металлов, находящиеся в почвах в связанном состоянии, могут переходить в подвижное состоя-

ние и быть доступными для растений, создавая дополнительный стрессовый эффект.

Результаты определения фитотоксичности почв фоновой и импактной зон СУМЗа представлены в табл. 2.

Анализ полученных результатов показал, что почвы ПП в условиях сильного загрязнения различаются, хотя и незначительно, по степени фитотоксичности. Для почв ПП 9(2) в сезоне 2017 г. отмечается в целом более низкий уровень фитотоксичности

Таблица 1

Table 1

Актуальная кислотность почв в районе СУМЗа
Relevant acidity of soils around SUMZ

| Дата Date | pH водной почвенной суспензии pH water soil suspension | | |
|--------------|---|-------------|-------------|
| | ПП 4 | ПП 9(1) | ПП 9(2) |
| 18.04.17 | 5,23 ± 0,02 | 4,49 ± 0,01 | 4,30 ± 0,03 |
| 02.05.17 | 5,22 ± 0,02 | 4,36 ± 0,09 | 4,42 ± 0,03 |
| 11.05.17 | 5,24 ± 0,01 | 4,32 ± 0,02 | 4,43 ± 0,03 |
| 18.05.17 | 5,50 ± 0,01 | 4,50 ± 0,05 | 4,40 ± 0,04 |
| 30.06.17 | 5,12 ± 0,01 | 4,29 ± 0,05 | 4,22 ± 0,02 |
| 17.07.17 | 5,28 ± 0,10 | 4,15 ± 0,05 | 4,32 ± 0,03 |

Таблица 2

Table 2

Фитотоксичность почв в районе СУМЗа
Phytotoxicity of soils around SUMZ

| Дата Date | Степень фитотоксичности Phytotoxicity degree | | |
|--------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | ПП 4 | ПП 9(1) | ПП 9(2) |
| 18.04.17 | Среднетоксичная Average toxicity | Слаботоксичная Slightly toxic | Среднетоксичная Average toxicity |
| 02.05.17 | Токсичная Toxic | Слаботоксичная Slightly toxic | Слаботоксичная Slightly toxic |
| 11.05.17 | Среднетоксичная Average toxicity | Среднетоксичная Average toxicity | Среднетоксичная Average toxicity |
| 01.06.17 | Токсичная Toxic | Сильнотоксичная Strong toxicity | Среднетоксичная Average toxicity |
| 30.06.17 | Сильнотоксичная Strong toxicity | Сильнотоксичная Strong toxicity | Слаботоксичная Slightly toxic |
| 17.07.17 | Сильнотоксичная Strong toxicity | Слаботоксичная Slightly toxic | Слаботоксичная Slightly toxic |

* Экспериментальные исследования проведены в Лаборатории эколого-аналитического мониторинга природных и антропогенно нарушенных экосистем НОЦ «Дендрэкология и садоводство» УГЛТУ.

(слабый и средний), чем на ПП 9(1). Это может быть связано с тем, что ранее на ПП 9(1) прошел пожар и продукты горения, попавшие в почву, оказали негативное воздействие на тест-культуру.

Фитотоксичность почвы фоновой зоны в течение весенне-летнего периода варьировала от среднетоксичной до сильнотоксичной, т.е. в целом водные почвенные вытяжки ПП 4 оказывали более сильное воздействие на тест-культуру, чем почвы импактной зоны. При этом был отмечен эффект агрегации клеток водоросли на фоне очень сильной стимуляции ростовых процессов хлореллы, когда величина коэффициента токсичности значительно превышала нормативный уровень, установленный используемой методикой [11].

Незначительная стимуляция ростовых процессов тест-культуры была отмечена и для почв ПП импактной зоны, причем агрегированные частицы были бесцветны, что указывает на разрушение зеленых пигментов хлореллы под действием экотоксикантов.

Стимуляция прироста численности клеток водоросли, по-видимому, определяется наличием в почве органических веществ и элементов минерального питания, переходящих в водную фазу. Кроме того, известно, что при наличии в среде доступного органического субстрата хлорелла способна переключать тип метаболизма с автотрофного на гетеротрофный [13].

Вероятно, что явление агрегации на фоне сильной стимуляции

ростовых процессов, отмеченное для контрольной ПП 4, связано в большей мере с тем, что для данной ПП характерен большой гумусовый горизонт, содержащий органические вещества, которые переходят в водные почвенные вытяжки. Они, как и экотоксиканты, могут оказывать влияние на формирование клеточной стенки автоспор хлореллы, что может привести к их агрегации, но при этом не происходит нарушение процесса фотосинтеза и разрушение хлорофилла.

Поскольку ранее нами было показано [14], что агрегация клеток *Chlorella vulgaris* Beijer, обнаруженная как при тестировании почвенных вытяжек, так и образцов воды, является негативным фактором, который должен учитываться при определении степени их фитотоксичности, то появление агрегации, выявленное для почв фоновой зоны, требует дальнейшего исследования.

Результаты определения актуальной кислотности и фитотоксичности почв, подверженных действию КСМ, приведены в табл. 3, из которой следует, что на территории, прилегающей к границам КСМ, активно идет процесс подщелачивания почв. Показатель pH почвенной суспензии варьирует от 7,96 до 8,27. Это можно объяснить поступлением в верхние горизонты почвы кальций- и магнийсодержащих соединений, в частности карбонатов кальция и магния, имеющих щелочные свойства.

Фитотоксичность почв в районе КСМ варьирует от слаботоксичной до среднетоксичной, при этом стимулирующего эффекта водных почвенных суспензий на ростовые функции тест-культуры не наблюдалось. Более низкий уровень фитотоксичности на ПП 1 и ПП 2 можно объяснить механизмом действия факельного выброса, когда область

Таблица 3

Table 3

Актуальная кислотность и фитотоксичность почв в районе КСМ
Relevant acidity and phytotoxicity of soils around KSM

| № ПП | Показатель Indicator | |
|------|--|---|
| | pH почвенной суспензии pH soil suspension | Степень фитотоксичности Degree phytotoxicity |
| 1 | 8,15±0,10 | Слаботоксичная Slightly toxic |
| 2 | 8,10±0,08 | Слаботоксичная Slightly toxic |
| 3 | 8,25±0,04 | Среднетоксичная Average toxicity |
| 4 | 8,16±0,02 | Среднетоксичная Average toxicity |
| 5 | 8,27±0,10 | Среднетоксичная Average toxicity |
| 6 | 7,96±0,03 | Среднетоксичная Average toxicity |

максимальной приземной концентрации загрязняющих веществ образуется на некотором расстоянии от источника загрязнения, зависящем от высоты трубы и интенсивности турбулентного перемешивания [15].

Для выяснения возможного влияния элементов минерального питания на ростовые функции тест-культуры было проведено их определение в почвах исследуемых ПП. В целом содержание нитратного азота, водорастворимого калия и подвижного

фосфора в исследуемых почвах вне зависимости от природы загрязнений и степени техногенной нагрузки находится на низком уровне и, вероятно, не может оказывать сильного стимулирующего влияния на ростовые функции тест-культуры *Chlorella vulgaris* Beijer.

Выводы

Определена фитотоксичность почв сосновых древостоев, произрастающих в зонах действия разных по составу аэро-

техногенных загрязнений. Показано, что негативное влияние водных почвенных вытяжек на тест-культуру проявляется в агрегации клеток и разрушении хлорофилла водоросли. Выявлено, что для почв фоновой зоны в условиях сильной стимуляции ростовых процессов тест-культуры наблюдается агрегация клеток *Chlorella vulgaris* Beijer, происходящая без разрушения хлорофилла. Для выяснения причин данного эффекта необходимы дополнительные исследования.

Библиографический список

1. Чеснокова С.М., Чугай Н.В. Биологические методы оценки качества объектов окружающей среды: учеб. пособие. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. – 92 с.
2. Юсупов И.А., Залесов С.В., Наркин В.М. Загрязнение почв промышленными выбросами медеплавильного комбината на Среднем Урале // Вклад ученых и специалистов в развитие химико-лесного комплекса: тез. докл. обл. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. акад., 1995. С. 106-108.
3. Юсупов И.А., Луганский Н.А., Залесов С.В. Состояние искусственных сосновых молодняков в условиях аэропромвыбросов. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. акад., 1999. 185 с.
4. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1970. 491 с.
5. Пименова Е.В., Леснов А.Е. Химические методы в агроэкологическом мониторинге почвы: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. ГСХА, 2009. 145 с.
6. ГОСТ 26951-86. Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1987. 7 с.
7. ГОСТ 27753.1-88. Грунты тепличные. Метод приготовления водной вытяжки. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1989. 4 с.
8. ГОСТ 27753.6-88. Почвы. Методы определения водорастворимого калия. М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1989. 8 с.
9. Кропачева Т.Н. Электрохимические методы анализа: учеб.-метод. пособие. Ижевск: Изд. центр «Удмуртский университет», 2016. 41 с.
10. Практикум по агрохимии / под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 1989. 304 с.
11. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04. Токсикологические методы контроля. Методика определения токсичности проб поверхностных пресных, грунтовых, питьевых, сточных вод, водных вытяжек из почвы, осадков сточных вод и отходов по изменению оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer). М.: МПР России, 2004. 25 с.
12. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.9-02. Токсикологические методы контроля. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водоросли. М.: МПР России, 2002. 23 с.
13. Growth and ultrastructure of *Chlorella pyrenoidosa* / S.W. Huang, V.C. Liao, H.C. Chen [et al.] // Chin. Soc. Microbiol. 1989. P. 18–19.

14. Шавнин С.А., Марина Н.В., Голиков Д.Ю. Оценка фитотоксичности техногенных отходов // Изв. Оренб. гос. аграрн. ун-та. 2013. № 4 (42). С. 204–206.

15. Природопользование, охрана окружающей среды и экономика: Теория и практикум: учеб. пособие / под ред. А.П. Хаустова. М.: РУДН, 2009. 613 с.

Bibliography

1. Chesnokova S.M., Chugay N.V. Biological methods of assessment of quality of objects of the environment: studies. grant. Vladimir: Vladim publishing house state un-ty, 2008. 92 p.

2. Yusupov I.A., Zalesov S.V., Narkin V.M. Soil Pollution by industrial emissions of copper smelting plant in the Middle Urals // Contribution of scientists and specialists in the development of chemical-forest complex: Abstracts of the regional scientific and technical conference. Yekaterinburg: Ural state forestry acad., 1995. P. 106-108.

3. Yusupov I.A., Lugansky N.A., Zalesov S.V. State of artificial pine young stands in terms of Agroprom-biznes. Yekaterinburg: Ural state forestry acad., 1999. 185 p.

4. Arinushkina E.V. Guide to the chemical analysis of soils. M.: Publishing house of the Moscow university, 1970. 491 p.

5. Pimenova E.V., Lesnov A.E. Chemical methods in agroenvironmental monitoring of the soil: studies. grant. Perm: VPO Permskaya GSHA FSEI publishing house, 2009. 145 p.

6. GOST 26951-86. Soils. Definition of nitrates by an ionometrichesky method. Moscow: USSR State standard committee, 1987. 7 p.

7. GOST 27753.1-88. Hothouse soil. Method of preparation of a water extract. Moscow: USSR State standard committee, 1989. 4 p.

8. GOST 27753.6-88. Soils. Methods of definition of water-soluble potassium. Moscow: USSR State standard committee, 1989. 8 p.

9. Kropacheva T. N. Electrochemical methods of the analysis: studies. method. grant. Izhevsk: Publishing center «Udmurt University», 2016. 41 p.

10. A workshop on agrochemistry / Under the editorship of V.G. Mineev. M.: MSU publishing house, 1989. 304 p.

11. PND F T 14.1:2:3:4.10-04. Toxicological control methods. A technique of determination of toxicity of tests superficial fresh, soil, drinking, sewage, water extracts from the soil, rainfall of sewage and waste on change of optical density of culture of an alga a chlorella (*Chlorella vulgaris* Beijer). M.: MPR of Russia, 2004. 25 p.

12. PND F T 14.1:2:3:4.9-02. Toxicological control methods. A technique of determination of toxicity of waters, water extracts from soils, rainfall of sewage and waste on change of level of fluorescence of a chlorophyll and number of cages of an alga. M.: MPR of Russia, 2002. 23 p.

13. Growth and ultrastructure of *Chlorella pyrenoidosa* / S.W. Huang, V.C. Liao, H.C. Chen [et al.] // Chin. Soc. Microbiol. 1989. P. 18–19.

14. Shavnin S.A., Marina N.V., Golikov D.Yu. Assessment of phytotoxicity of technogenic waste // News of the Orenburg state agricultural university. 2013. No. 4 (42). P. 204–206.

15. Environmental management, environmental protection and economy: Theory and practical work: Studies a grant / Under the editorship of A.P. Haustov. M.: RUDN, 2009. 613 p.
